

Modélisation mathématique de l'évolution de la topographie des surfaces peintes destinées au secteur automobile

Thibauld Nion

Directeur de thèse:
Dominique Jeulin



Les aciers plats



- 58 *milliards* \$
- Métallurgie très complexe
- Importants traitements de surface

Les aciers plats



- 58 *milliards* \$
- Métallurgie très complexe
- Importants traitements de surface
 - chimie pour le vieillissement
 - rugosité pour la mise en forme

Peinture pour automobile



- 10% coût d'une voiture
- Impact environnemental
- Qualité du véhicule

Peinture pour automobile

Industrie automobile

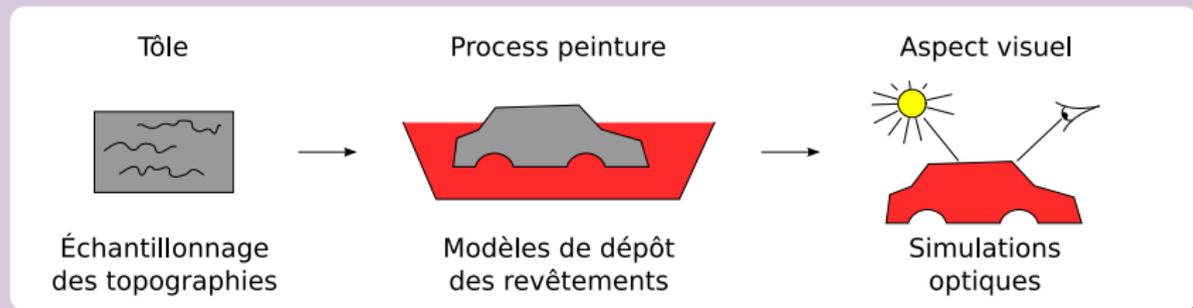
- Moins de peinture
- Meilleur aspect



Producteurs d'acier

Plus de contraintes sur les surfaces des aciers plats

Le projet de thèse



Caractérisation des surfaces

Exploitation des données

Modélisation physique des dépôts

Caractérisation des surfaces

Exploitation des données

Modélisation physique des dépôts

Caractérisation des surfaces

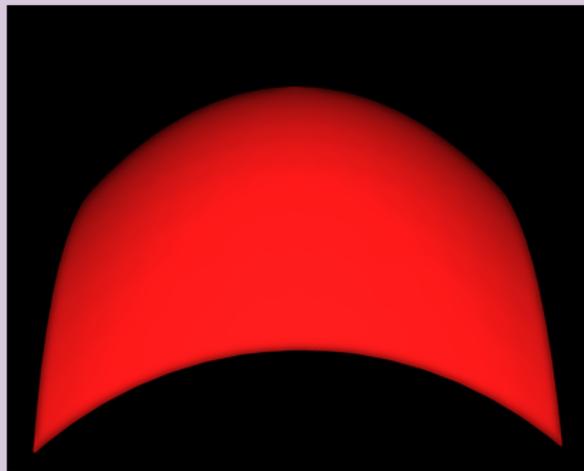
Aspect peint et rugosité

Aspect peint et géométrie de surface

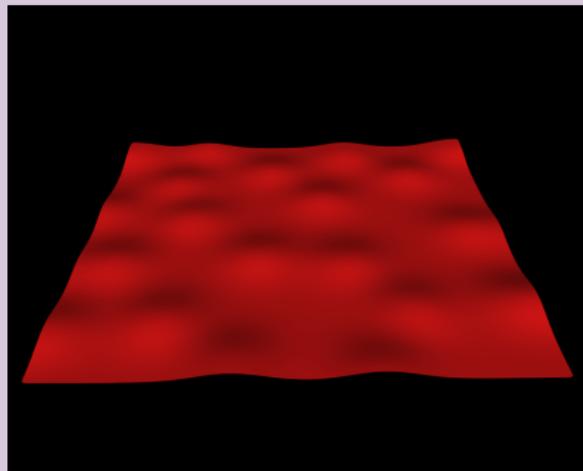


Grandes déformations

Aspect peint et géométrie de surface

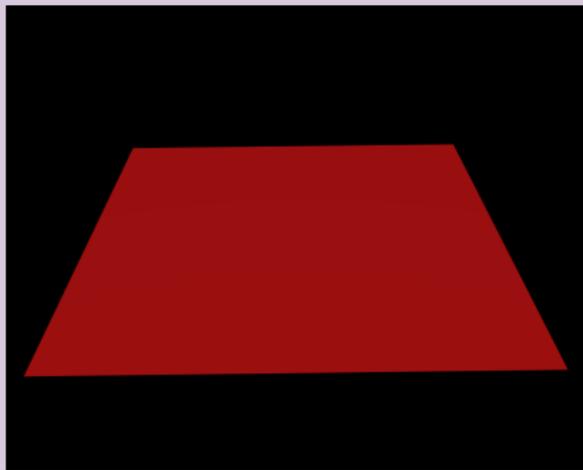


Grandes déformations



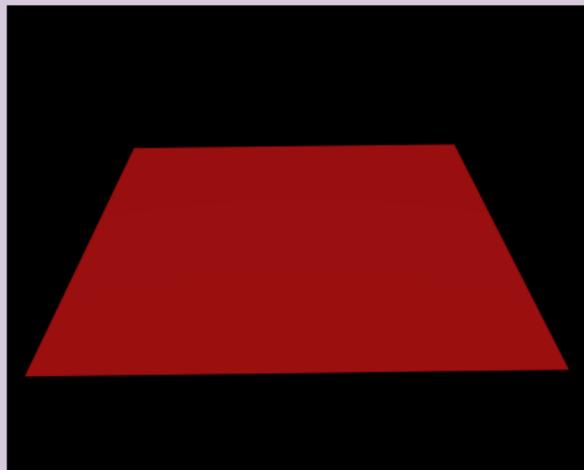
“Bosses”

Aspect peint et géométrie de surface

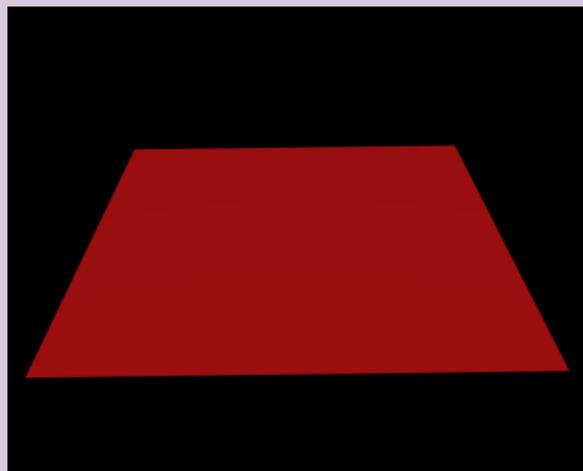


Surface rugueuse

Aspect peint et géométrie de surface

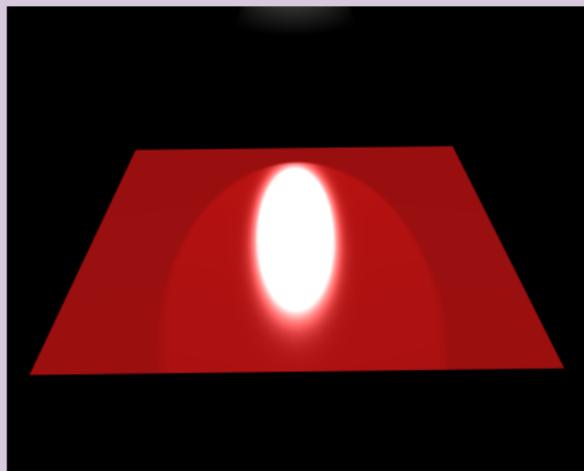


Surface rugueuse

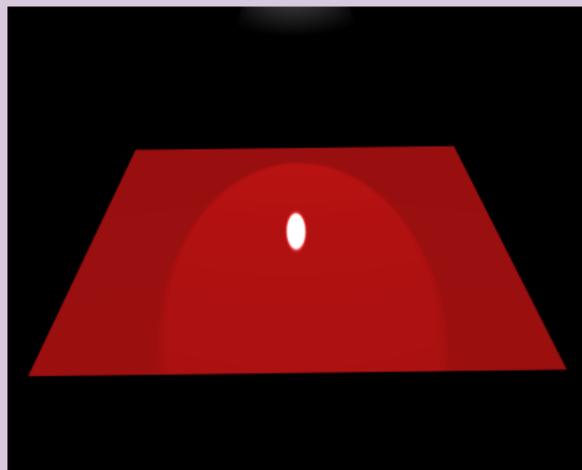


Surface lisse

Aspect peint et géométrie de surface

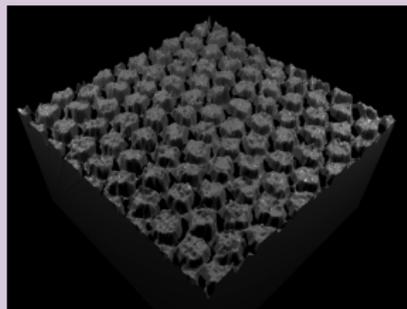
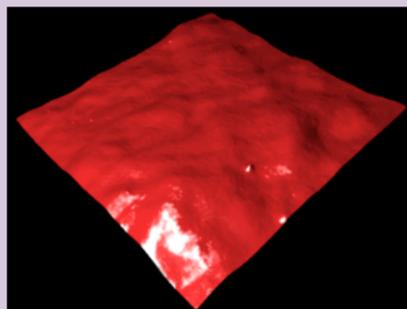
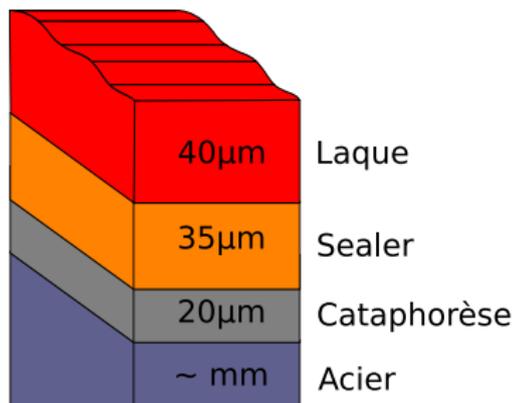


Surface rugueuse

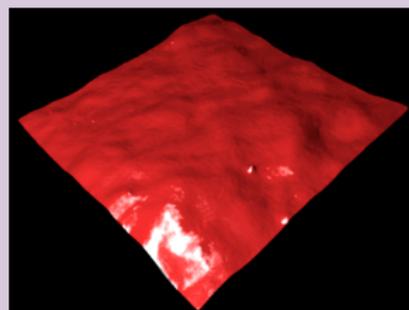
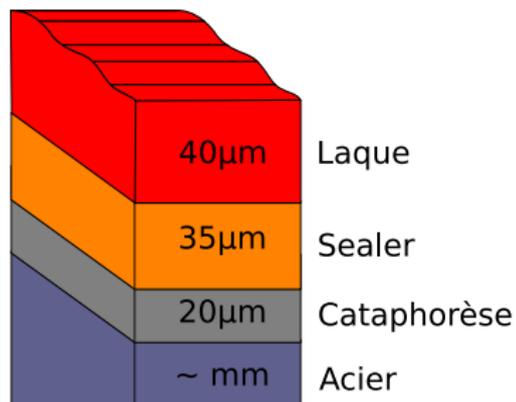


Surface lisse

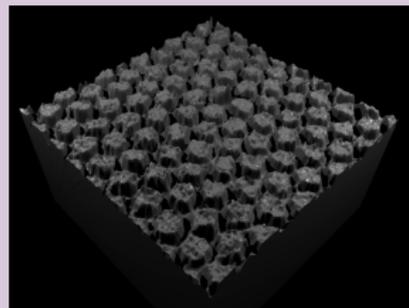
La peinture sur les aciers plats



La peinture sur les aciers plats



Motifs $\geq 1\text{ mm}$

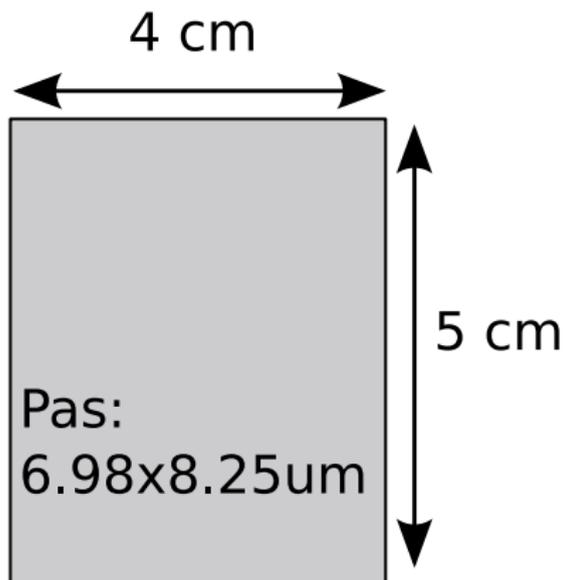


Motifs de 100 μ m à qqmm

Caractérisation des surfaces

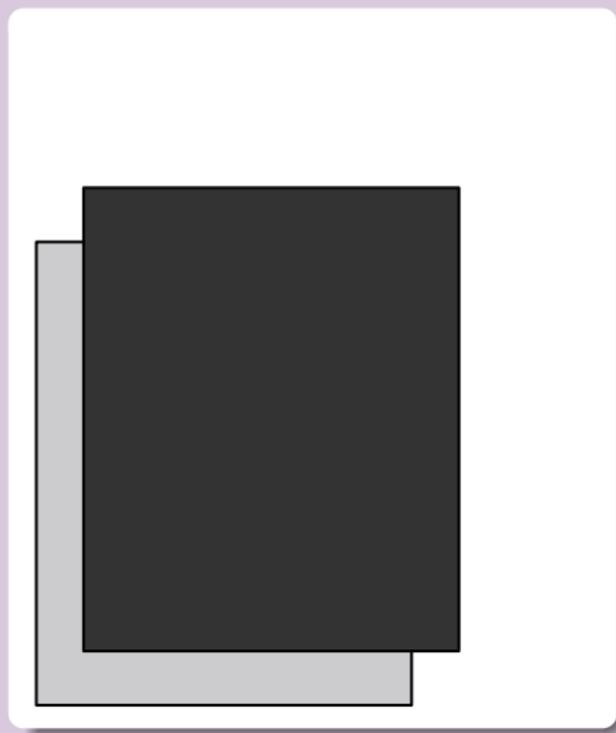
Campagne d'expériences

Protocole expérimental



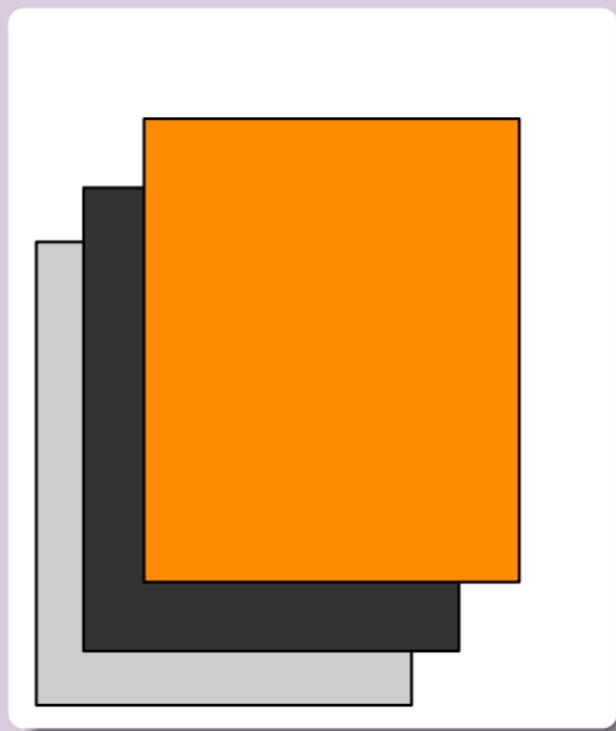
- Champ de 5x4cm
- 4 revêtements
- 42 échantillons
- Interférométrie

Protocole expérimental



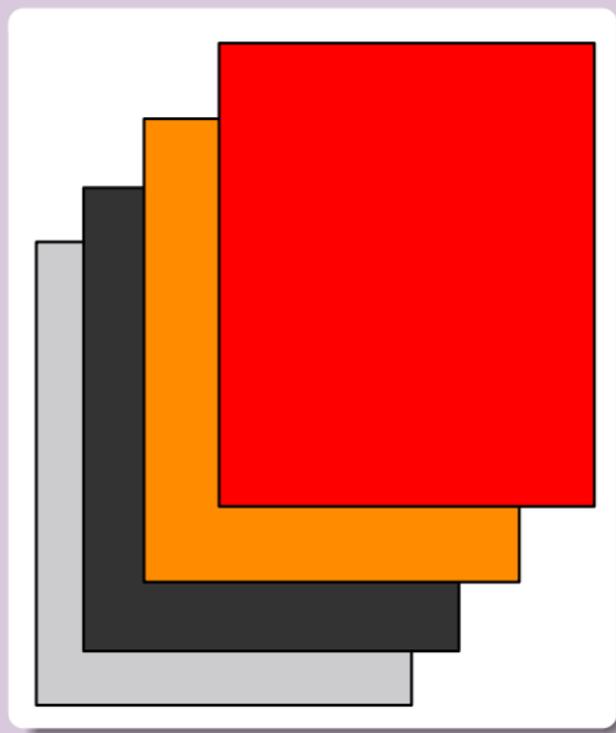
- Champ de $5 \times 4 \text{ cm}$
- 4 revêtements
- 42 échantillons
- Interférométrie

Protocole expérimental



- Champ de 5x4cm
- 4 revêtements
- 42 échantillons
- Interférométrie

Protocole expérimental



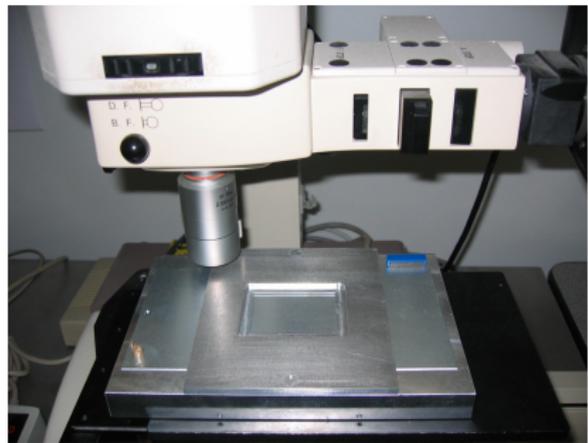
- Champ de $5 \times 4 \text{ cm}$
- 4 revêtements
- 42 échantillons
- Interférométrie

Protocole expérimental



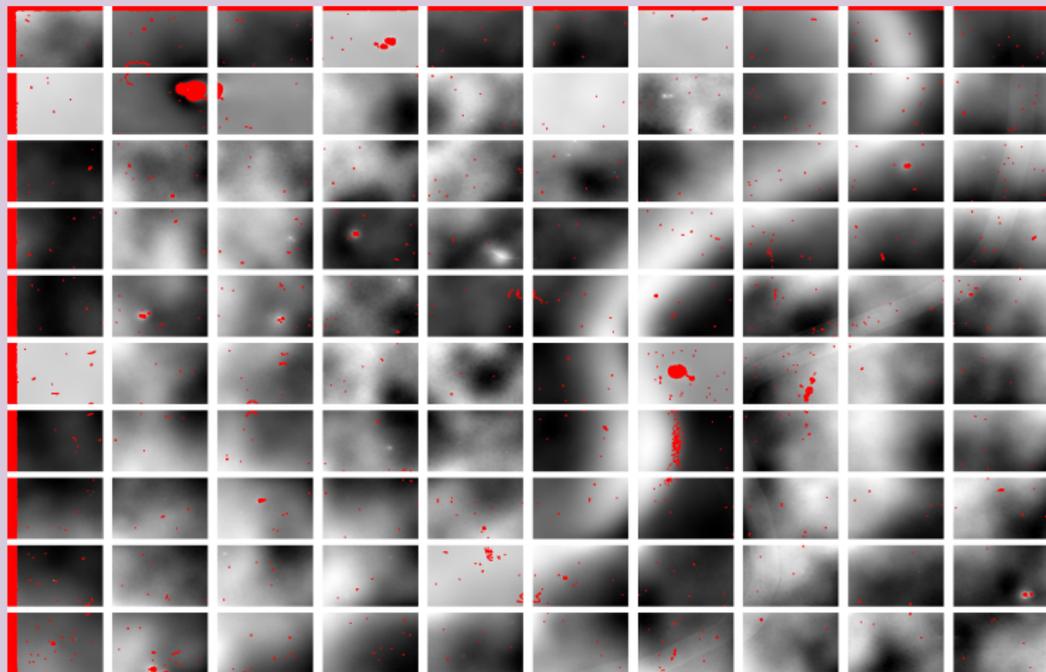
- Champ de 5x4cm
- 4 revêtements
- 42 échantillons
- Interférométrie

Protocole expérimental



- Champ de $5 \times 4 \text{ cm}$
- 4 revêtements
- 42 échantillons
- Interférométrie

Relevés topographiques “bruts”



Un échantillon peint

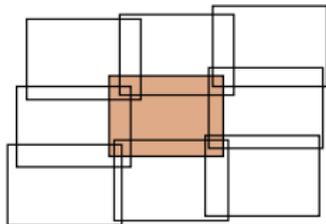
Caractérisation des surfaces

Exploitation des données

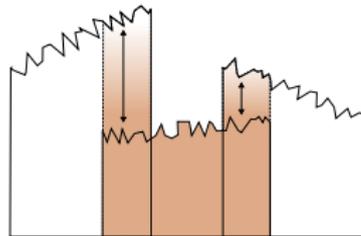
Modélisation physique des dépôts

Traitements logiciels

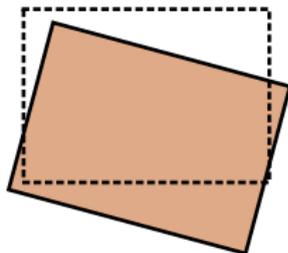
Chaîne de pré-traitement



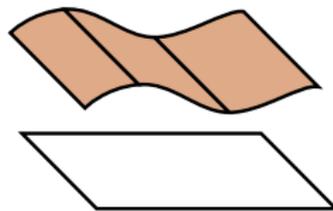
Recollement



Compensation de tilts



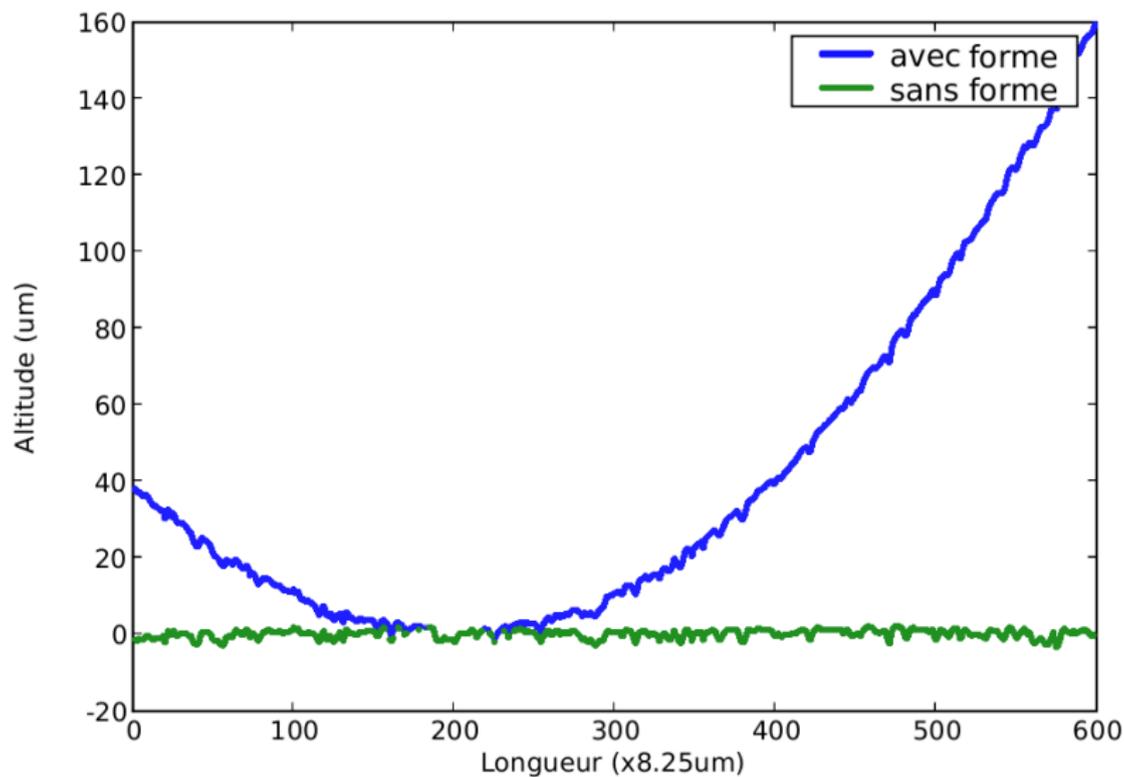
Calage (superposition)



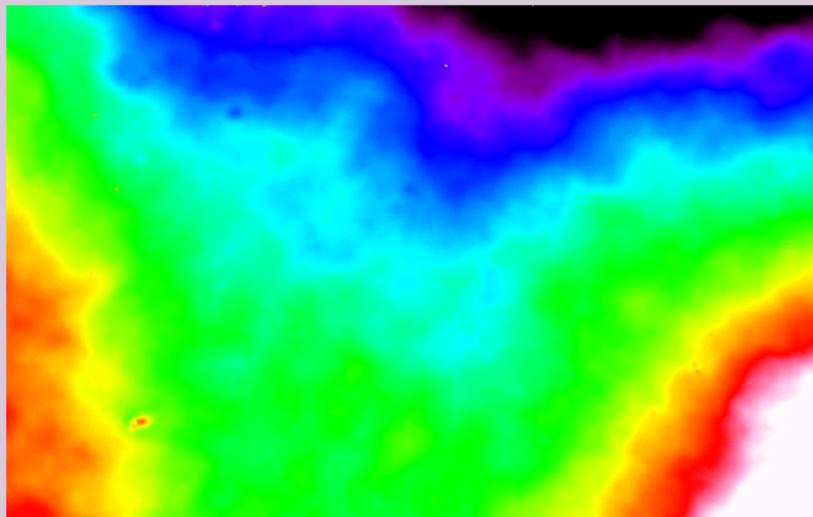
Correction de forme

Correction de forme

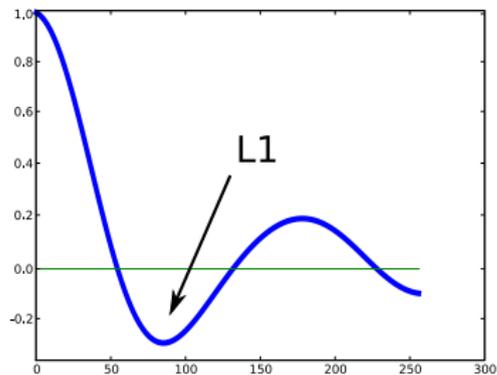
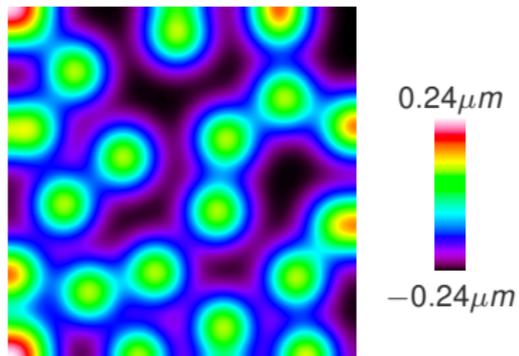
La forme sur un profil



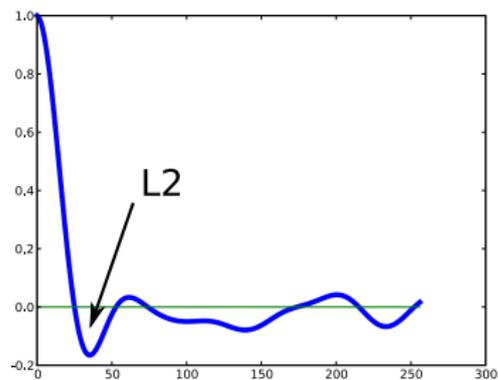
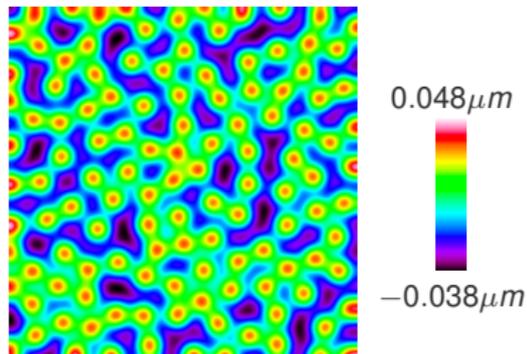
Sur une tôle réelle



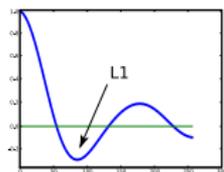
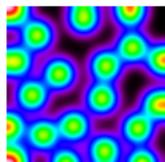
Identification des échelles par auto-corrélation



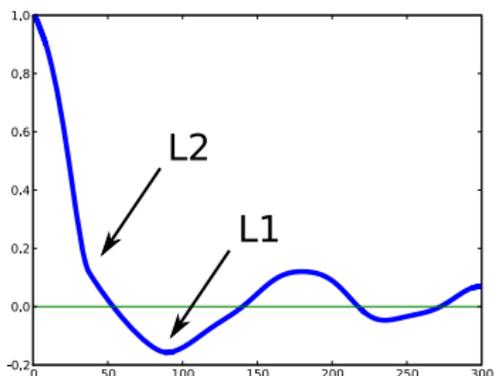
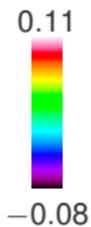
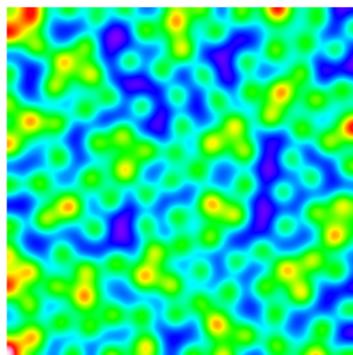
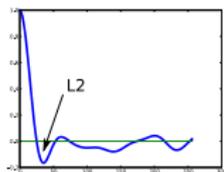
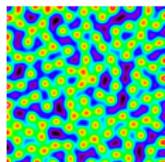
Identification des échelles par auto-corrélation



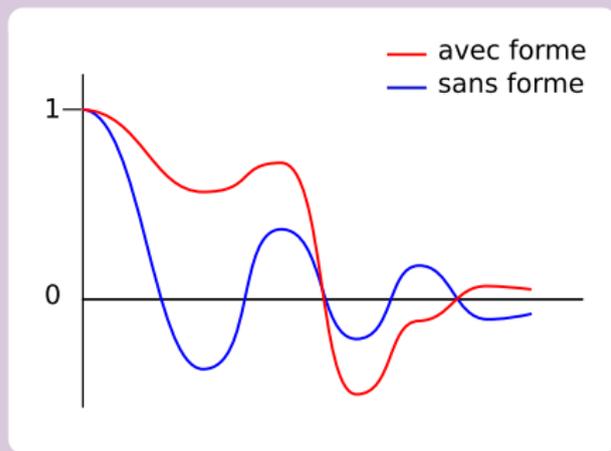
Identification des échelles par auto-corrélation



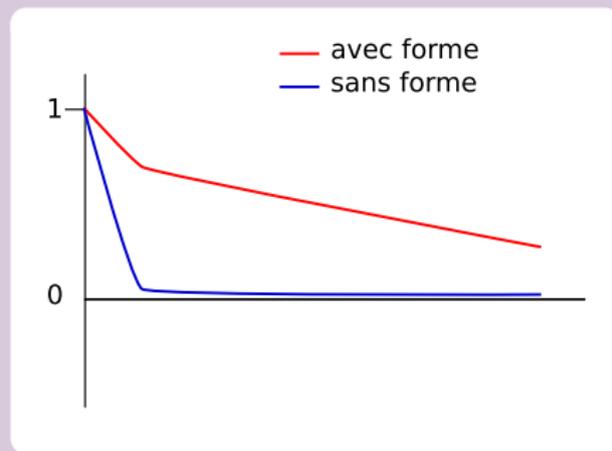
+



Forme et auto-corrélation

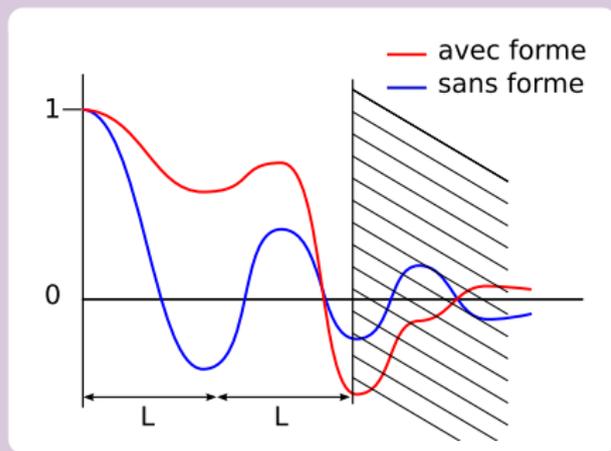


Superposition d'échelles

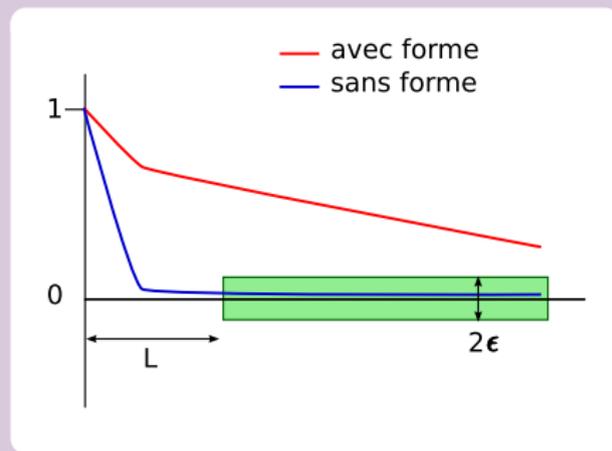


Décorrélation "rapide"

Critères de détection

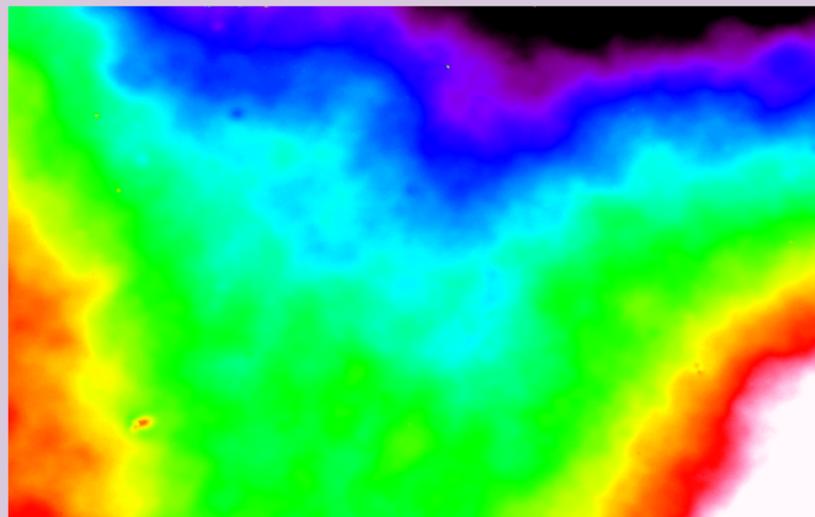


Superposition d'échelles



Décorrélation "rapide"

Exemple sur une tôle avec primaire

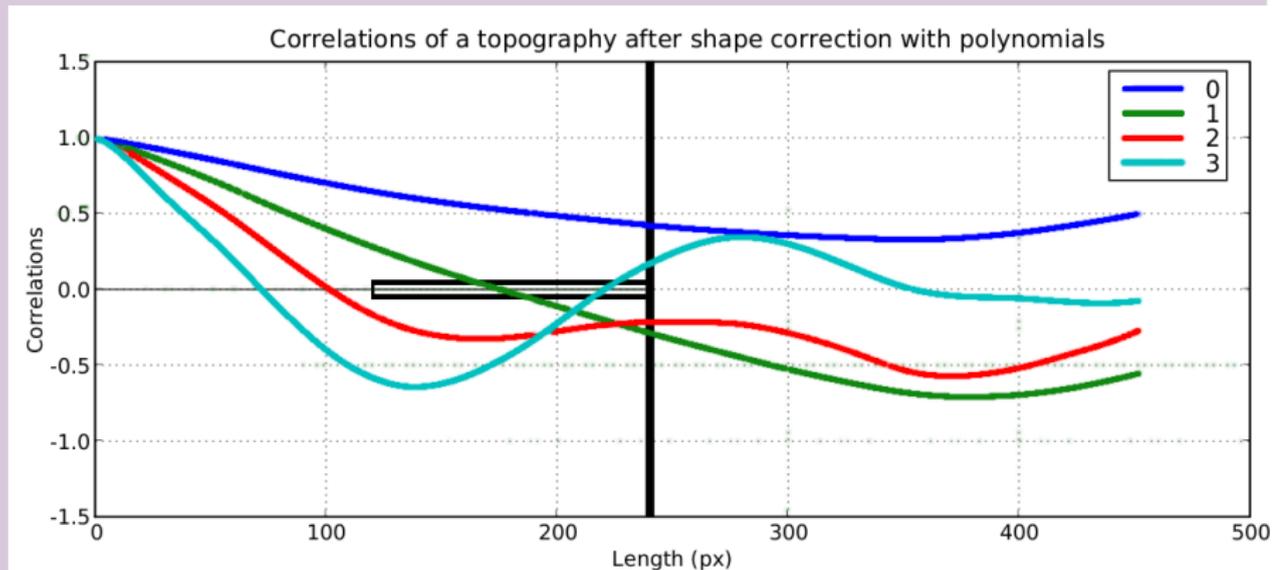
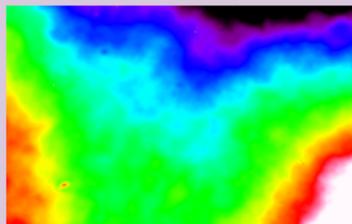


12.6 μm

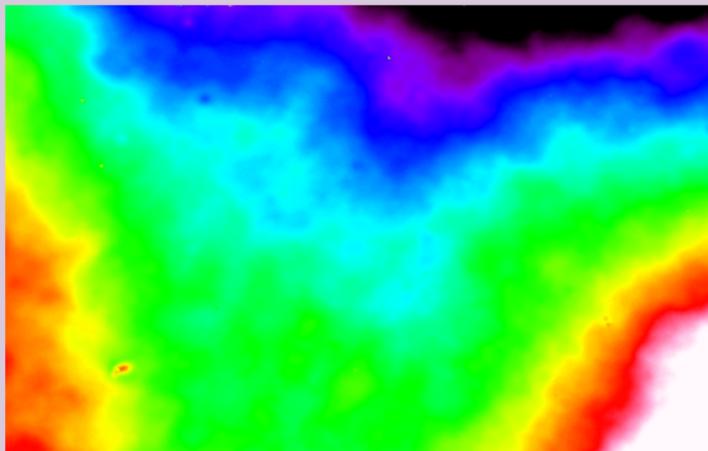


-29.4 μm

Exemple sur une tôle avec primaire



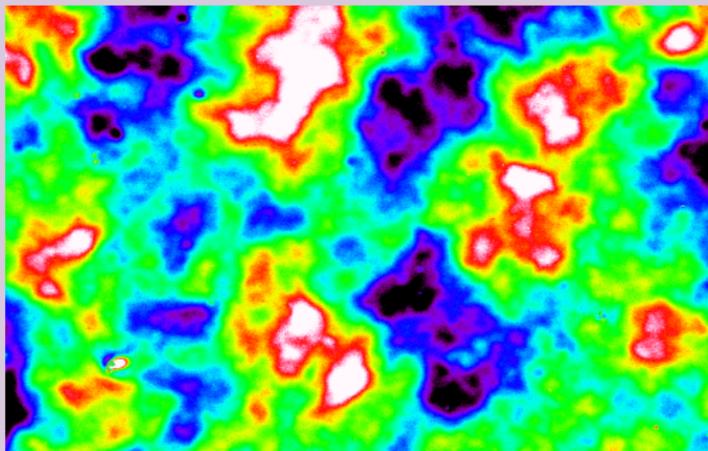
Exemple sur une tôle avec primaire



12.6 μm



-29.4 μm



2.81 μm

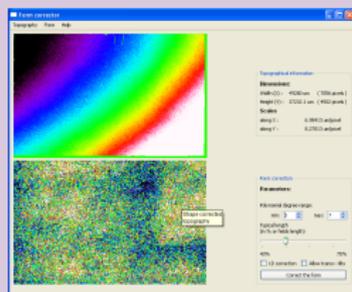


-2.81 μm

Exploitation des données

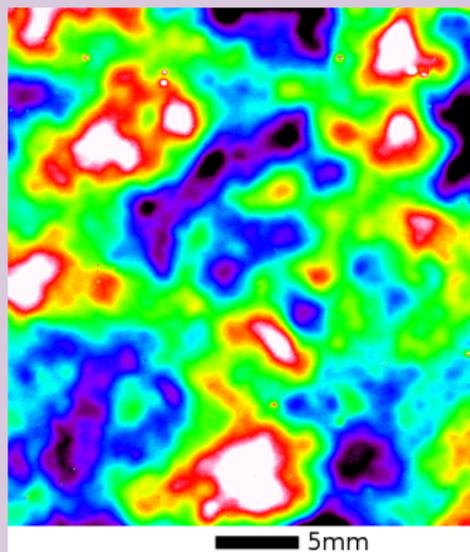
Premiers résultats

Bilan des traitement logiciels



- 165 topographies entièrement restaurées
- défauts restants :
 - zones non mesurées
 - calage non parfait (+/- 5 pixels)
- une chaîne de traitement complète
- un outil de correction de forme

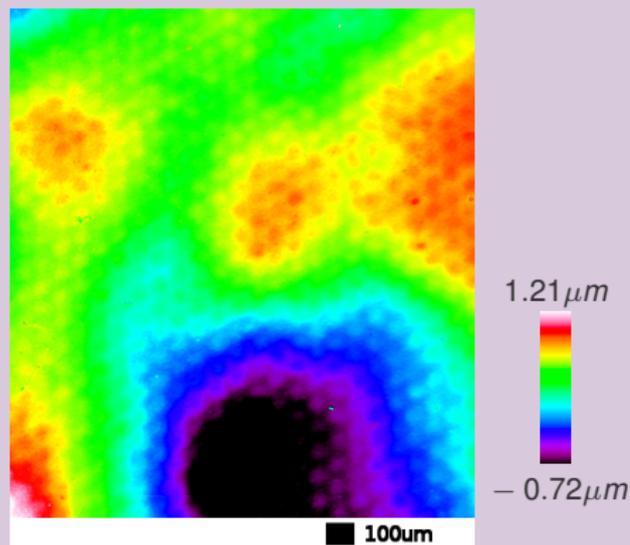
Observations



Surface laquée

- Larges motifs mis en valeur
- Petits motifs atténués mais toujours visibles

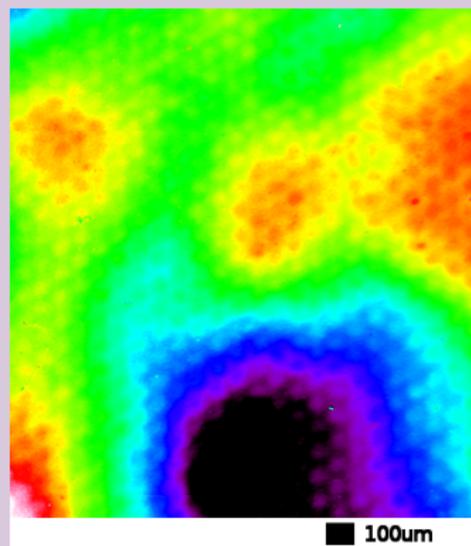
Observations



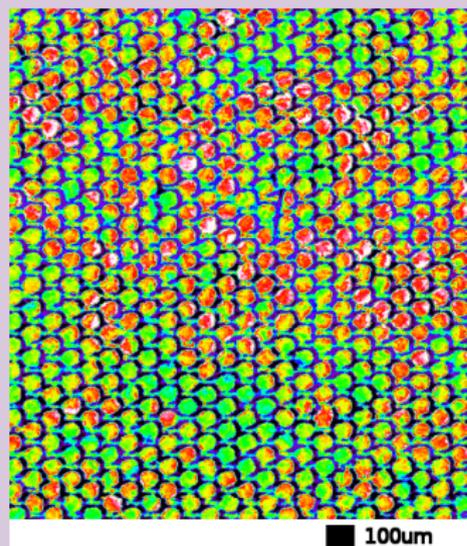
Détail d'une surface laquée

- Larges motifs mis en valeur
- Petits motifs atténués mais toujours visibles

Observations



Détail d'une surface laquée



Détail d'une surface "nue"

Caractérisation des surfaces

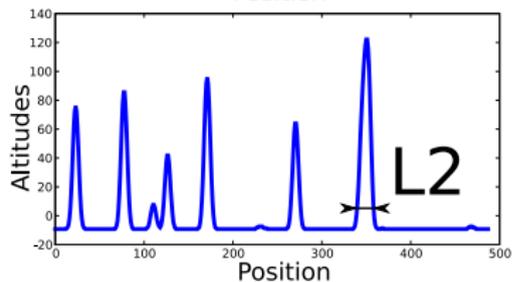
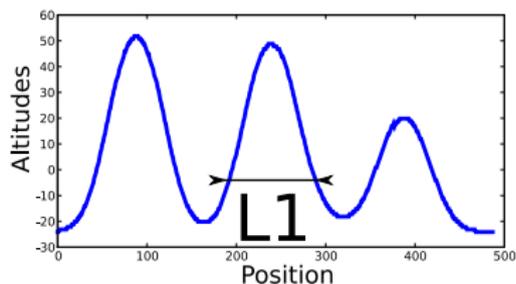
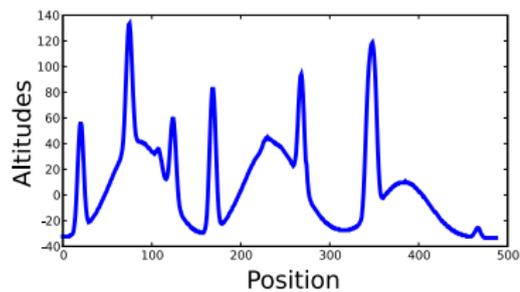
Exploitation des données

Modélisation physique des dépôts

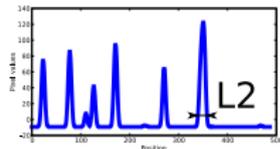
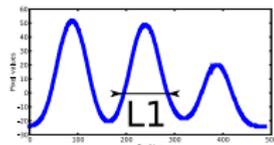
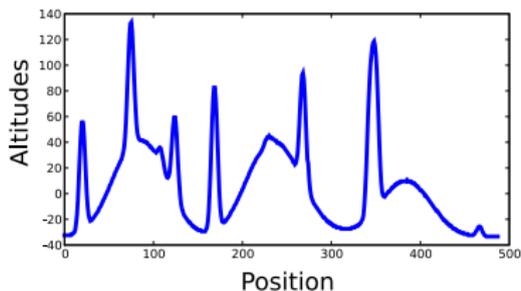
Modélisation physique des dépôts

Quantification des échelles

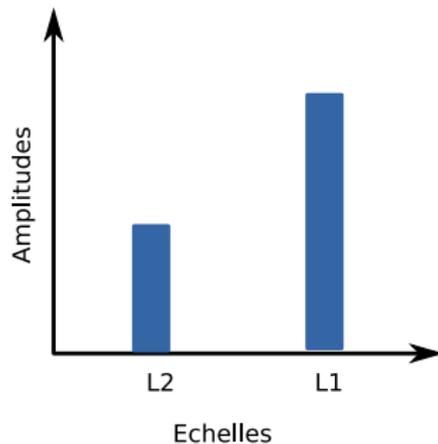
Les spectres de rugosité



Les spectres de rugosité



Spectre de rugosité

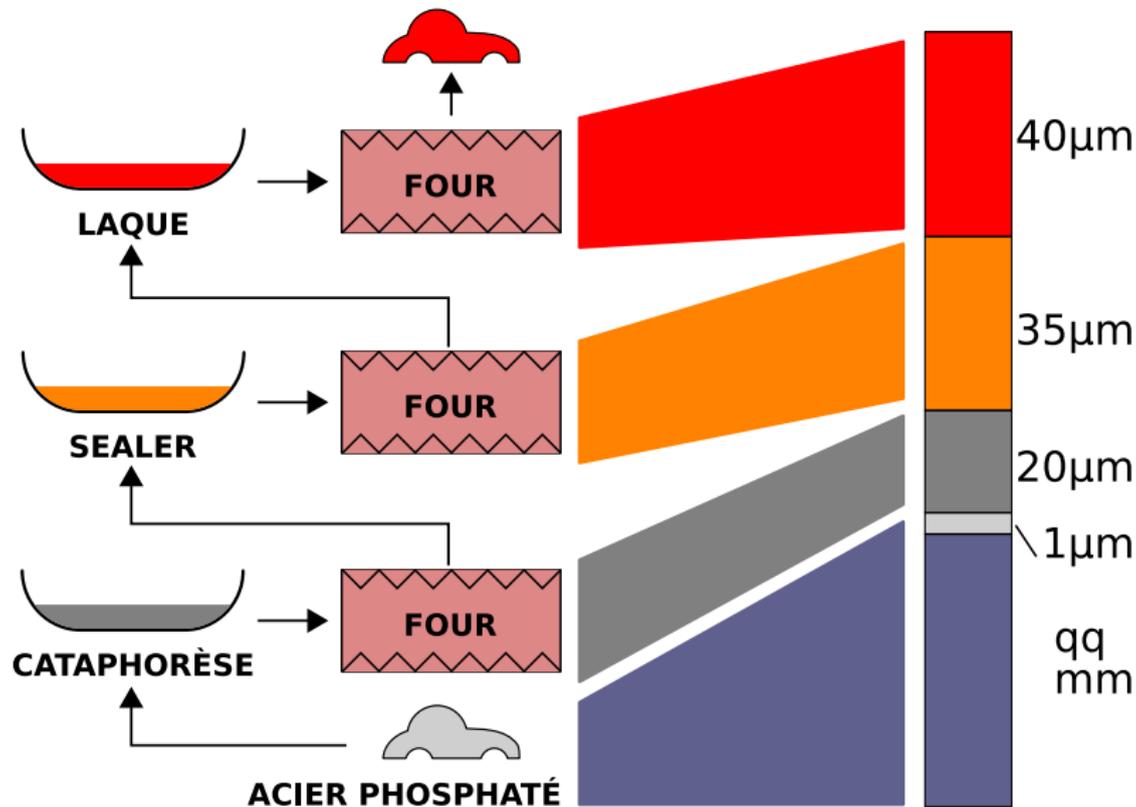


$$Ra = \frac{1}{N} \int |Z - \mathbf{E}(Z)|$$

Modélisation physique des dépôts

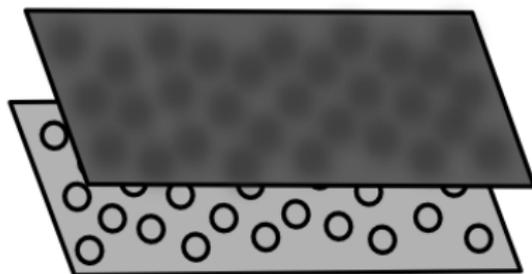
Modèles hydrodynamiques

Processus à modéliser



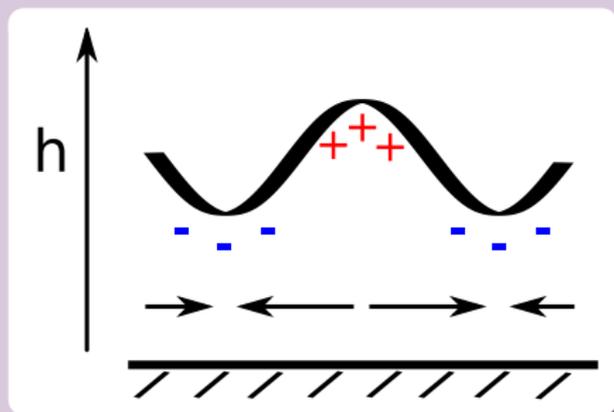
Dépôt de cataphorèse

Cataphorèse



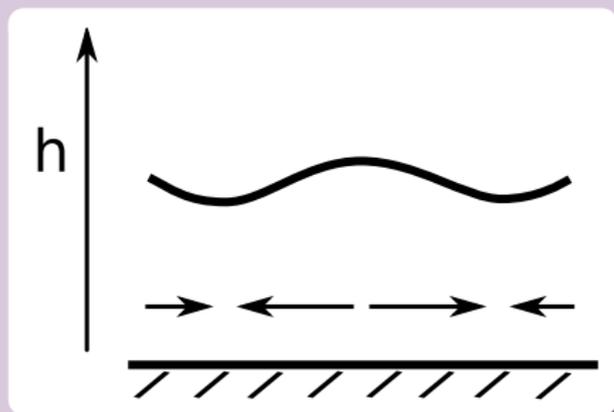
Acier galvanisé

Tension de surface



- Pression de Laplace
- Tendence d'un film à se tendre
- Difficile à définir pour des liquides complexes

Tension de surface



- Pression de Laplace
- Tendance d'un film à se tendre
- Difficile à définir pour des liquides complexes

Tension de surface



Expérience de goutte posée

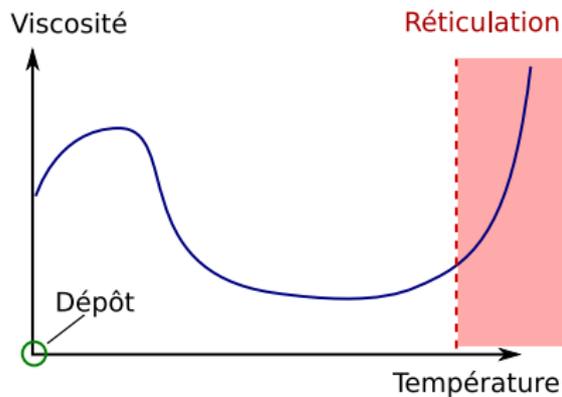
- Pression de Laplace
- Tendance d'un film à se tendre
- Difficile à définir pour des liquides complexes

Viscosité



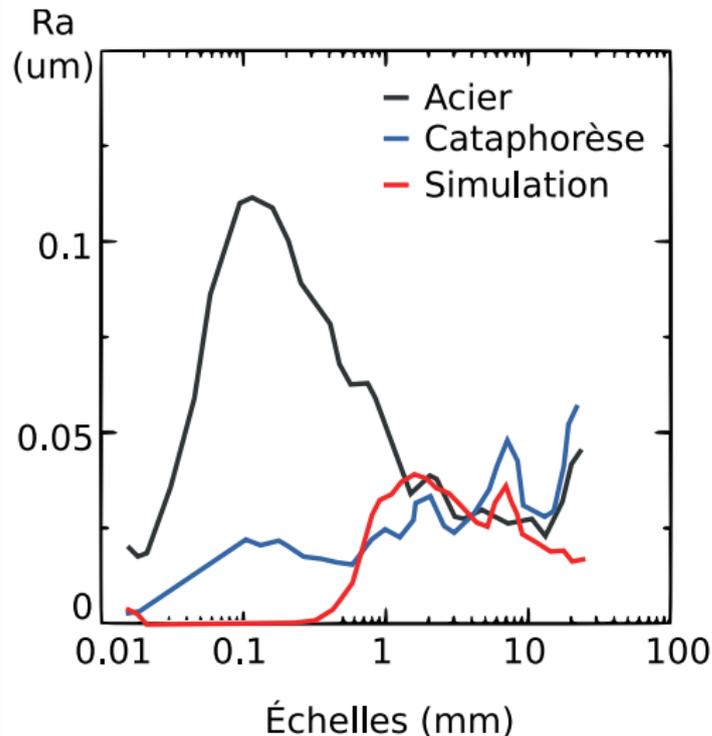
- Résistance à la déformation
- Évolution au cours du dépôt :
 - avec la température (Newtonien)
 - avec les déformations (Rhéo-fluidifiant)

Viscosité



- Résistance à la déformation
- Évolution au cours du dépôt :
 - avec la température (Newtonien)
 - avec les déformations (Rhéo-fluidifiant)

Prédictions pour la cataphorèse



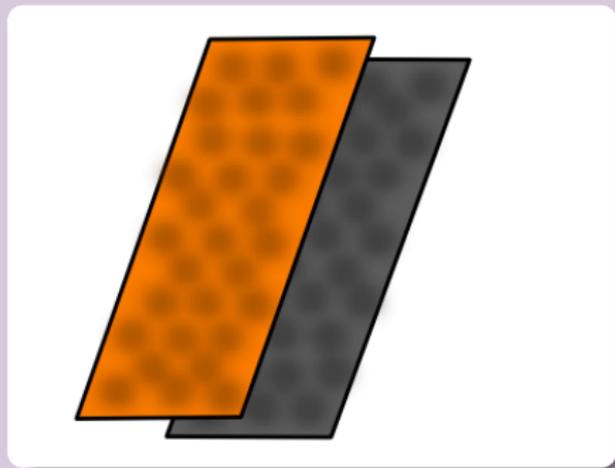
Spectres de rugosité



A. Lemaître.
Note sur les
écoulements de
peinture : films
non-newtoniens.
LCPC, 2006

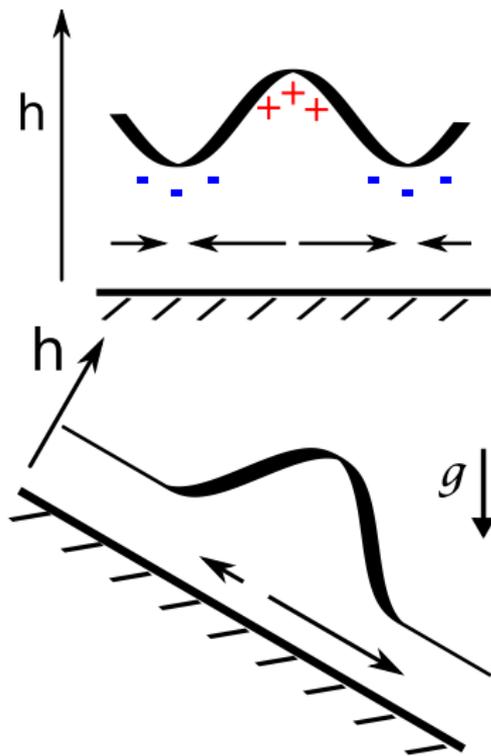
Dépôt de sealer (en vertical)

Sealer



Cataphorèse

Substrats inclinés



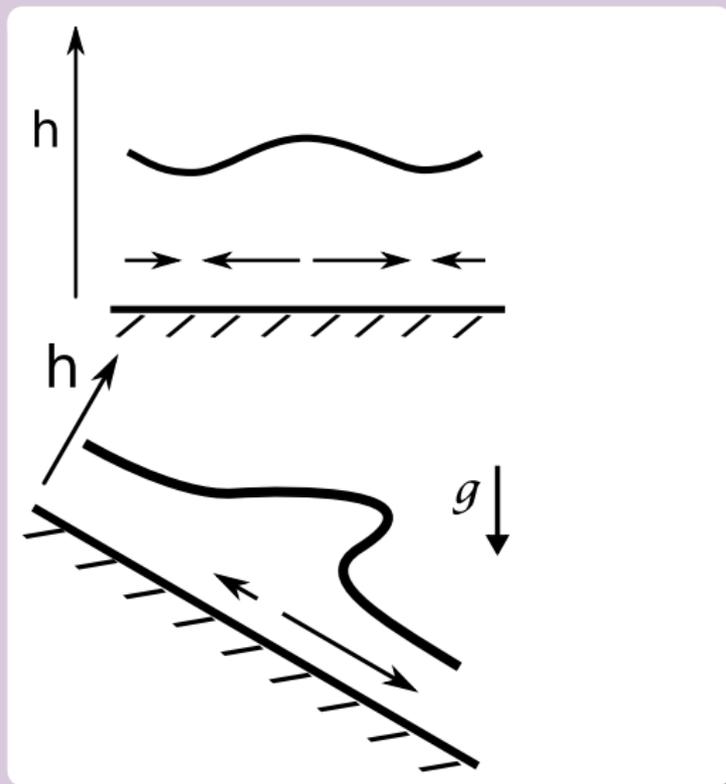
- Gravité
- Instabilités (?)



P. Manneville.

Étude de l'évolution
d'un film fluide sur un
support
irrégulier, incliné et
soumis à la gravité.
LadHyX, 2006

Substrats inclinés



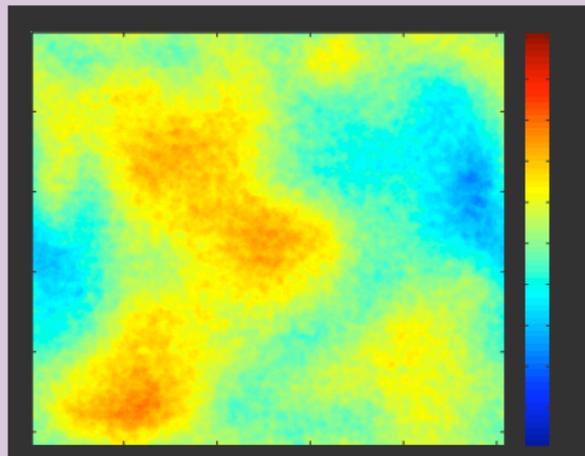
- Gravité
- Instabilités (?)



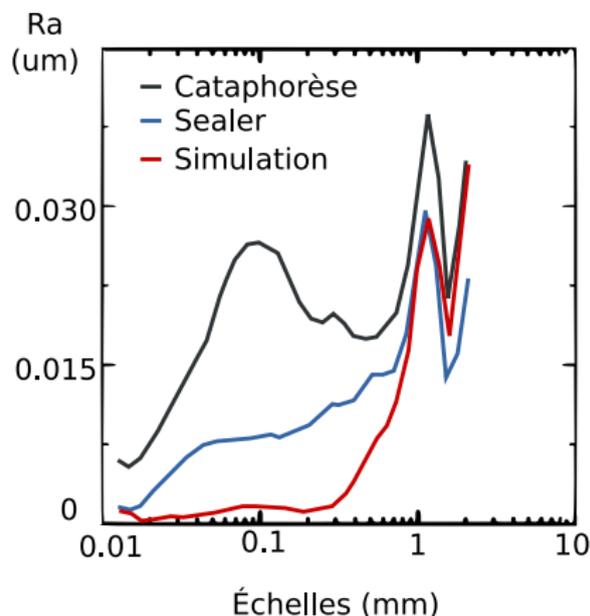
P. Manneville.

Étude de l'évolution
d'un film fluide sur un
support
irrégulier, incliné et
soumis à la gravité.
LadHyX, 2006

Prédiction pour le sealer (vertical)

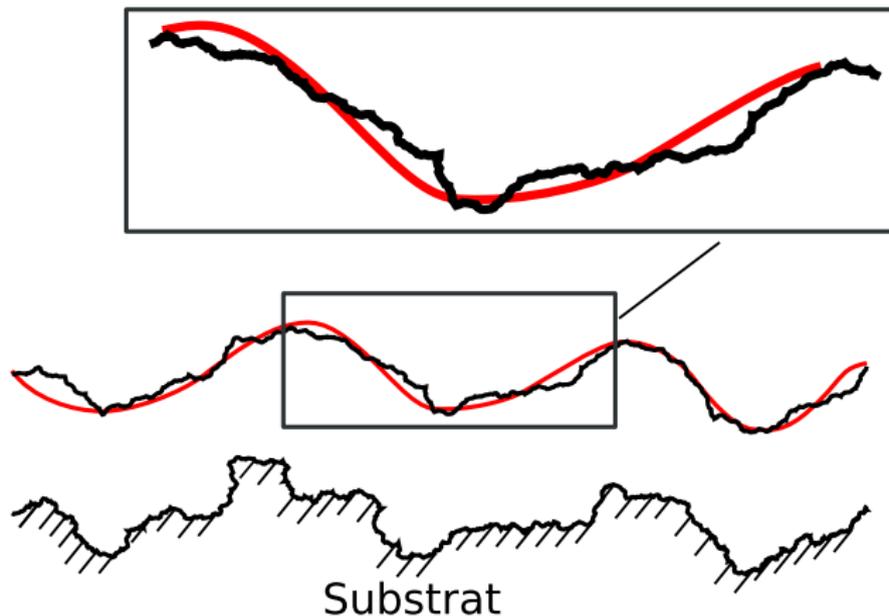


Exemple de simulation



Spectres de rugosité

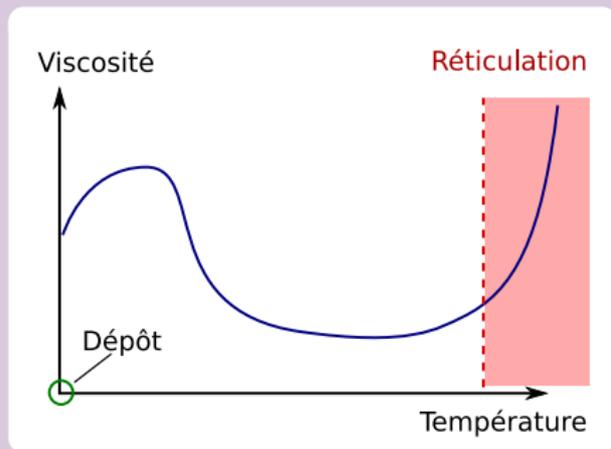
Bilan des modèles hydrodynamiques



Modélisation physique des dépôts

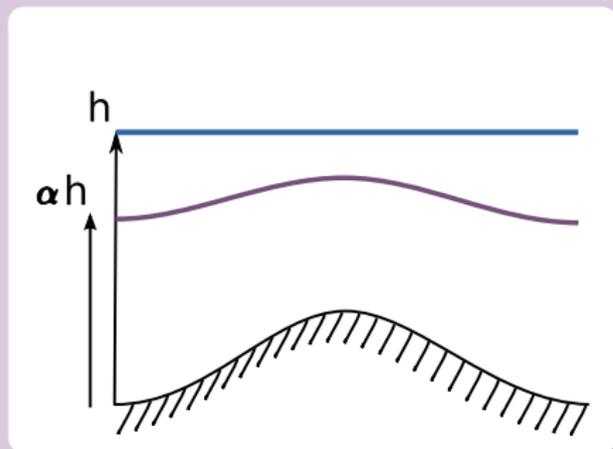
Le comportement des matériaux

Contraction du film



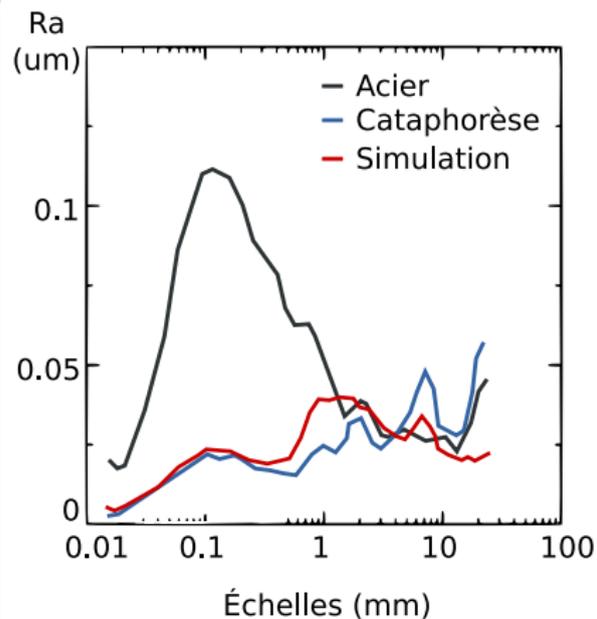
- Réticulation
- Transformation affine sur l'épaisseur du film
- Réapparition des motifs du substrat

Contraction du film

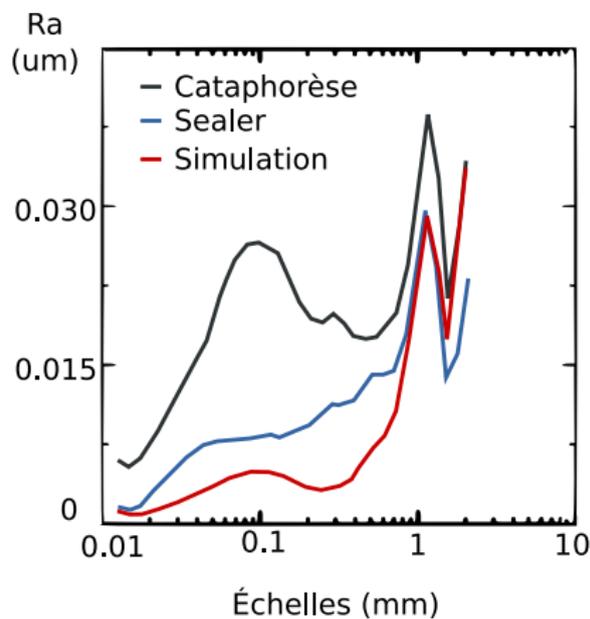


- Réticulation
- Transformation affine sur l'épaisseur du film
- Réapparition des motifs du substrat

Correction des modèles

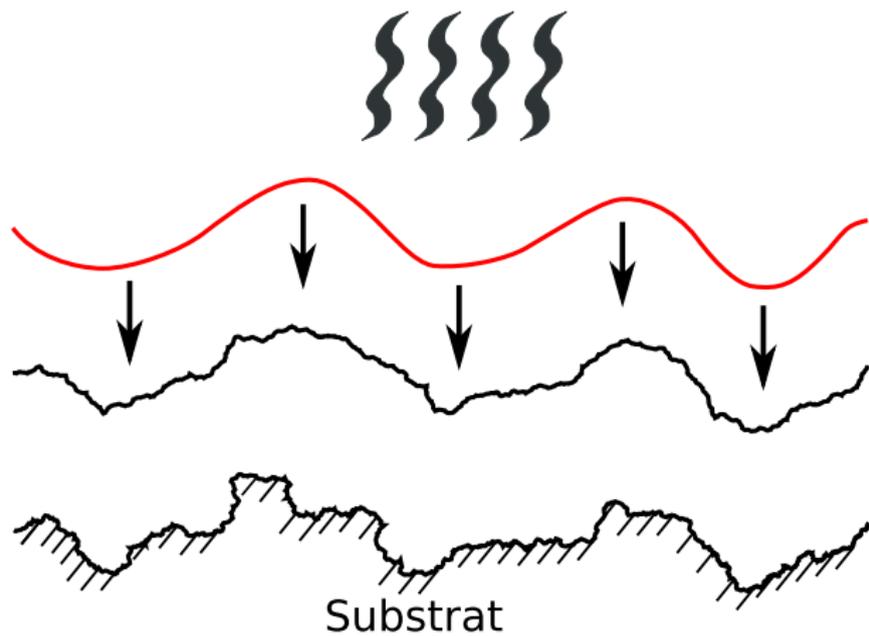


Substrat plan
(rheo-fluidifiant)



Substrat vertical
(newtonien)

Contraction du film



Bilan

- Vérité terrain
 - caractérisation correcte
 - outils logiciels réutilisables
- Évolution de la rugosité
 - Explications des motifs millimétriques ($500\mu m - 5mm$)
 - Pistes pour les motifs microniques ($50\mu m - 500\mu m$)
- Aspect peint
 - Travail exploratoire (lancer de rayon)
 - Pistes prometteuses (diffusion interne)

Perspectives

- Mesurer/modéliser les paramètres manquants
- Coupler écoulement, évaporation, réticulation
- Coordonner avec des modèles optiques

À terme

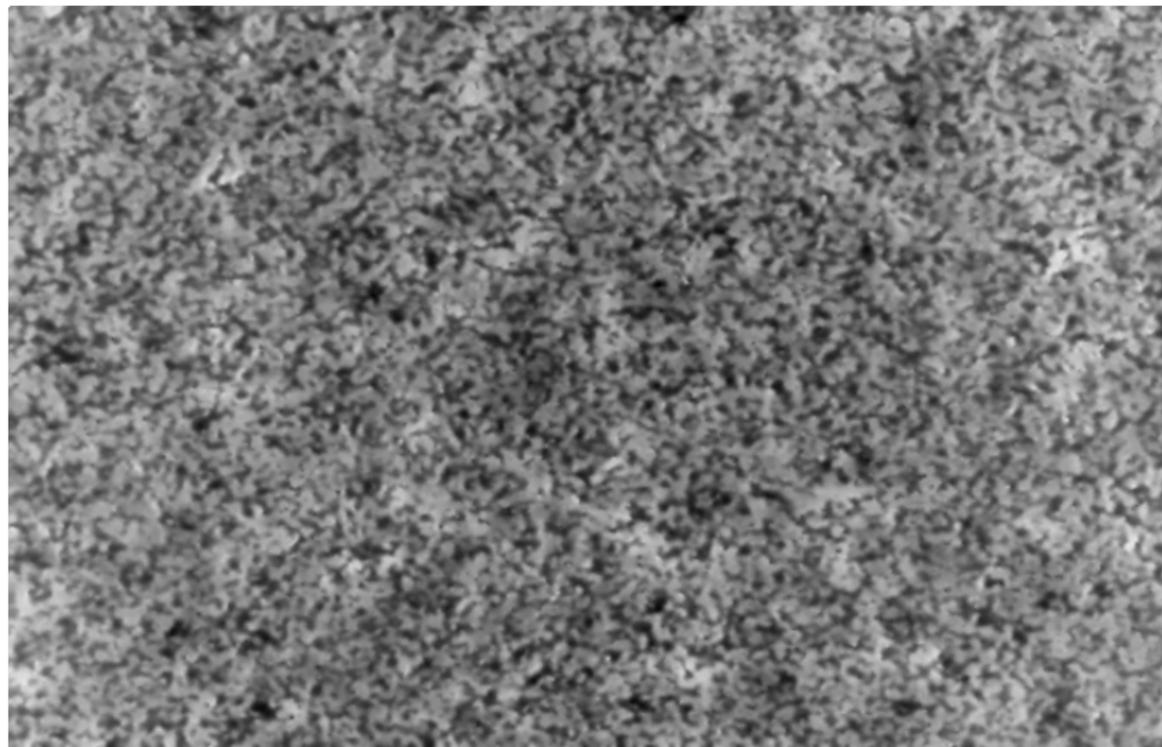
- Outils d'analyse et de modélisation de l'aspect peint
- Définition de nouveaux critères de qualité
- Conception de surfaces "idéales"

Merci !



Annexes

Les motifs sur les aciers plats

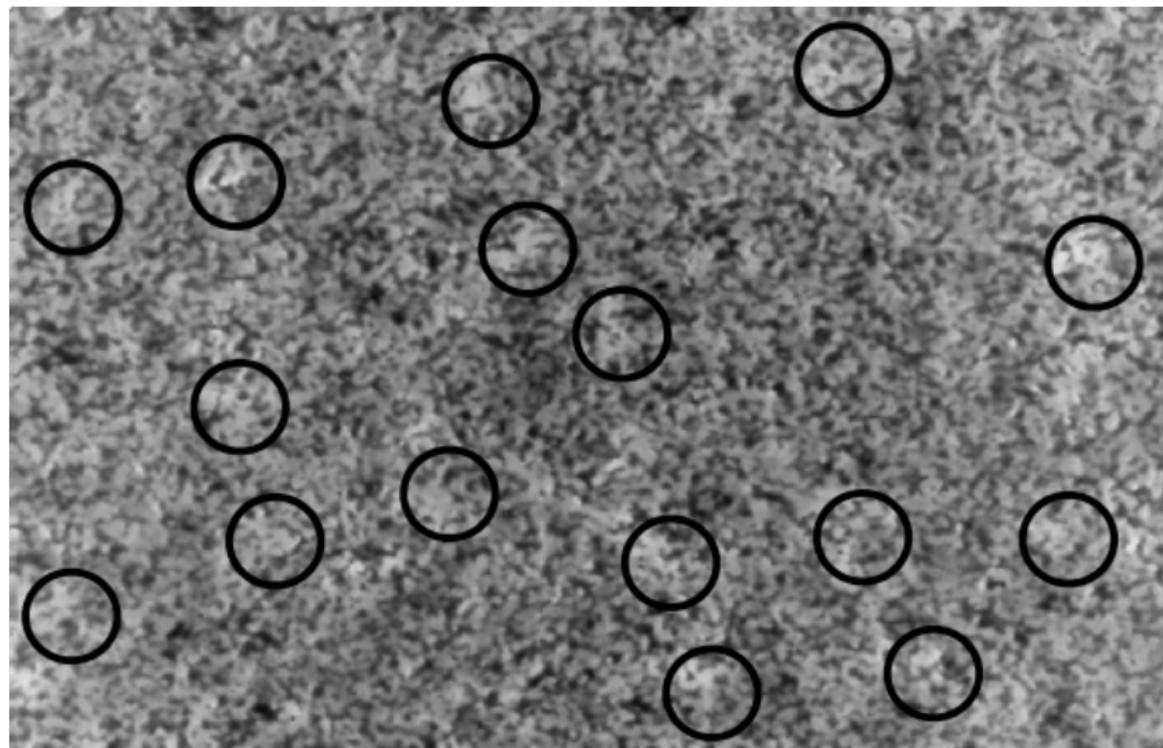


1mm

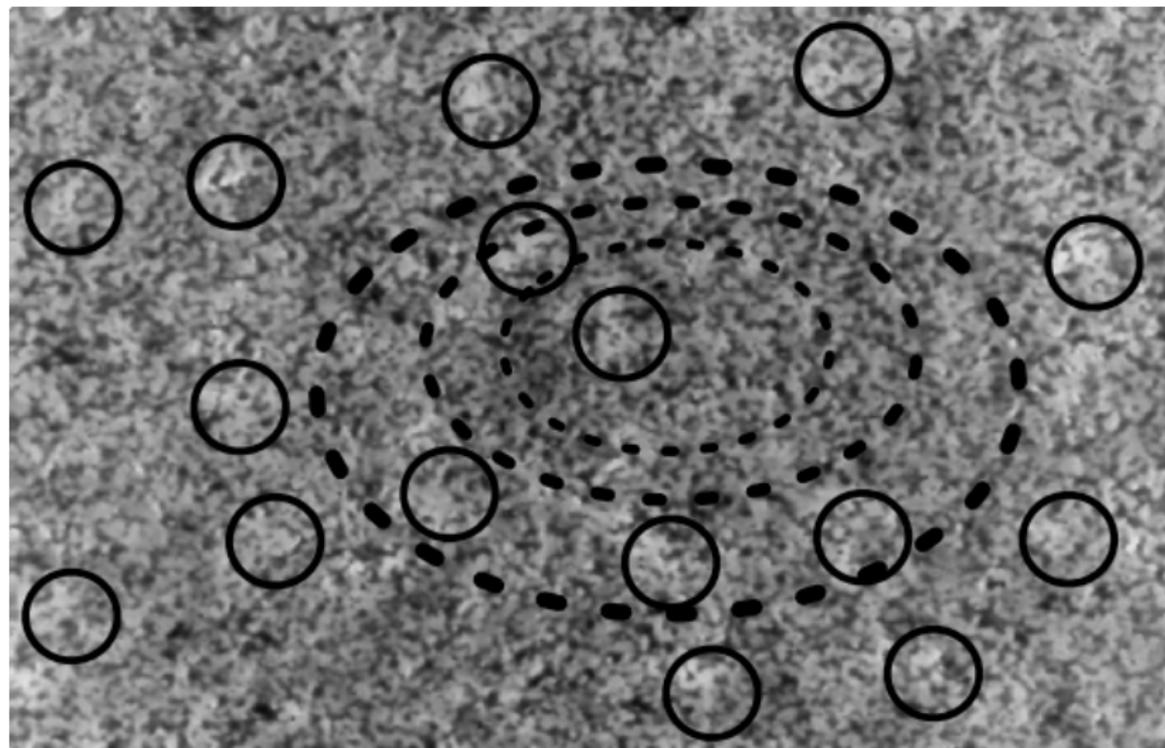
100um

300um

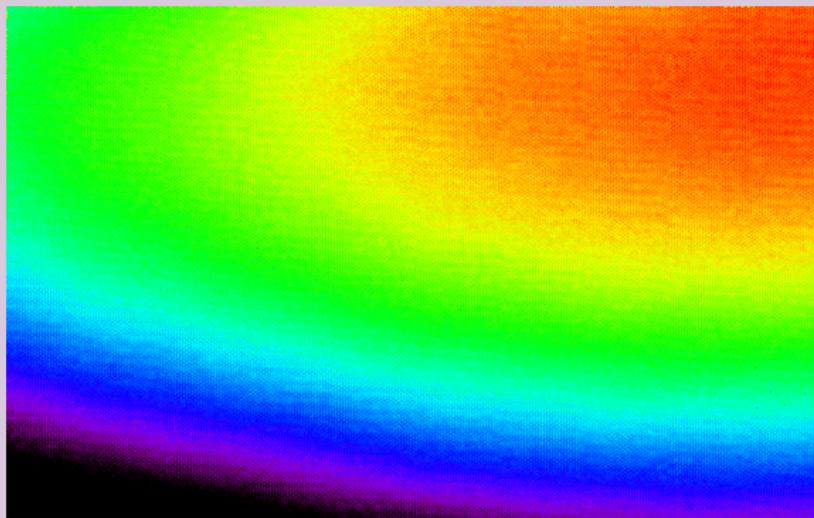
Les motifs sur les aciers plats



Les motifs sur les aciers plats



Exemple sur une tôle galvanisée

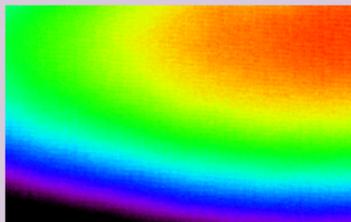


23.3 μm

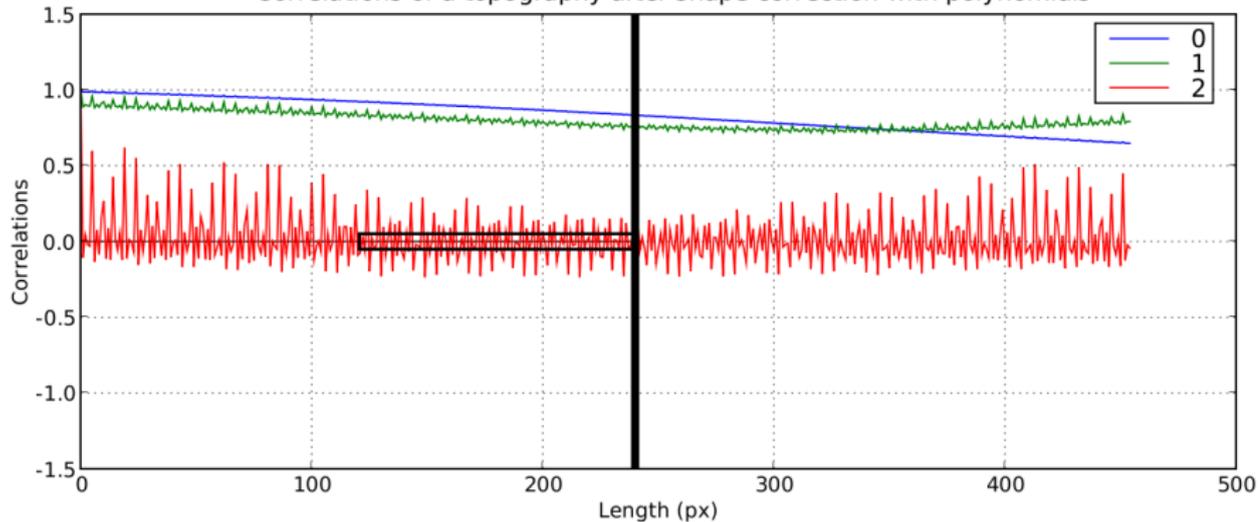


-52.8 μm

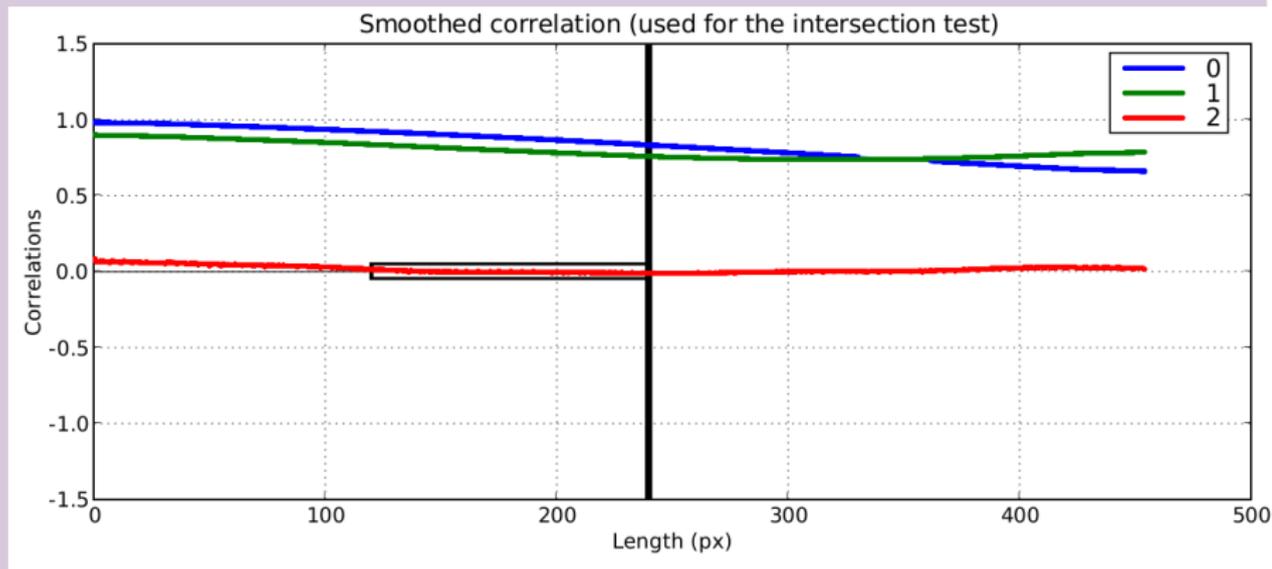
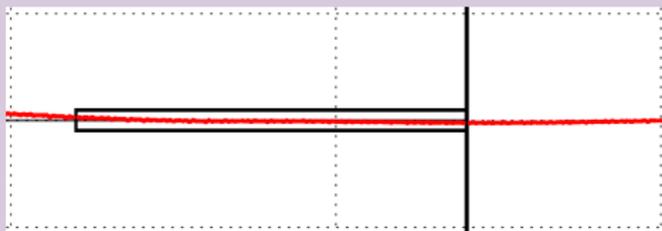
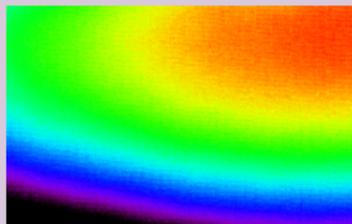
Exemple sur une tôle galvanisée



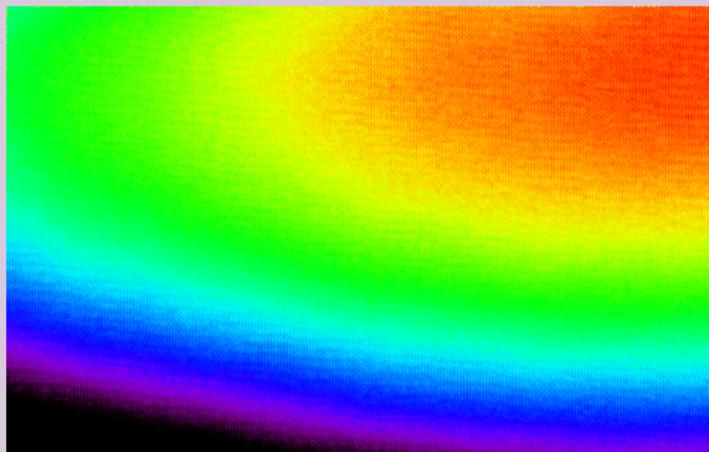
Correlations of a topography after shape correction with polynomials



Exemple sur une tôle galvanisée



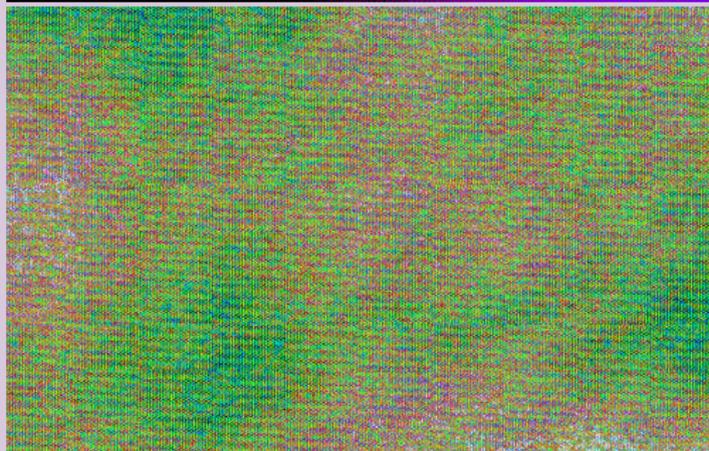
Exemple sur une tôle galvanisée



$23.3\mu m$



$-52.8\mu m$



$3.54\mu m$



$-3.54\mu m$

La forme d'un échantillon (zoom)

